

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DURANTE E APÓS COLISÃO DE UM NAVIO PSV COM UM FPSO

Autores: *Julio Cesar Ramalho Cyrino*¹ D.Sc
*Jorge Luis Martinez Fernández*² M. Sc.

E-mail: julio@peno.coppe.ufrj.br, jlfernandez@peno.coppe.ufrj.br

¹Professor, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia, Sala C-207b, RJ, Brasil.

²Engenheiro Naval, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI/PERU)

Resume

Hoje em dia, existe um crescente interesse no estudo e análise de métodos e procedimentos para o projeto de navios considerando cargas acidentais, em particular para casos da colisão e encalhamento. Nas bacias de produção de petróleo na costa brasileira existe uma grande concentração de plataformas, e conseqüente aumento do tráfego de embarcações nestas regiões do mar. Além disso, embarcações de apoio e navios aliviadores se aproximam muito destas plataformas, criando um quadro propício para colisões. Assim, o risco de colisão entre navios, navios e plataformas tem crescido bastante, o que preocupa tanto do ponto de vista de perdas de vidas humanas, como de perdas materiais e de degradação do meio ambiente marinho. Neste trabalho será estudado através de simulação numérica, utilizando o sistema computacional ANSYS/LS-DYNA, a colisão de uma embarcação de apoio com um FPSO de casco simples. Além disso, foi avaliada a resistência longitudinal do navio após a colisão através da curva momento fletor versus curvatura. A perda de resistência do navio avariado é determinada pela comparação do momento fletor máximo do navio intacto com o do navio avariado.

Palavras Chave: Energia de deformação, resistência ao impacto, critério de falha.

1. Introdução

A análise de colisão de navios é um problema bastante complexo devido ao acoplamento entre as respostas dos movimentos dos navios em ondas e a deformação estrutural durante o impacto. A energia cinética dissipada no desenvolvimento deste fenômeno pode ser feita considerando-se dois estudos separados, denominados: Dinâmica Externa e a Mecânica Interna da Colisão. Em (1) é mostrado que quantidade de energia cinética dissipada pela deformação estrutural é a mesma considerando-se ou não, explicitamente, o efeito do movimento dos navios em ondas.

Acidentes de navios com perda total ocorrem devido à colisão e encalhe associada a regiões de tráfego marítimo intenso e operações offshore com alto risco, o que leva a necessidade de se estudar a resistência ao colapso da seção de navios danificados por colisão, com vista a se conhecer a capacidade resistente residual ou se os danos conduzem progressivamente à falha total. Estes estudos devem ser introduzidos ainda na fase de projeto de navios e plataformas ou aplicados para auxiliar na tomada de decisões após ocorrência de um acidente.

Na simulação numérica da colisão considera-se o problema como puramente estrutural, onde ambos os navios são discretizados por malha de elementos finitos aplicando-se a análise dinâmica transiente explícita empregando-se o programa ANSYS/LS-DYNA Versão 12.0.

Os navios de referência para as análises de colisão são: um FPSO de 321.903 Tonn., e uma embarcação de apoio de 6125 Tonn. Vários cenários de colisão foram analisados para investigar os efeitos do impacto entre ambos os navios.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para simular a colisão de navios e estimar a resistência longitudinal após a colisão, a partir de parâmetros conhecidos dos navios e do método de análise, tais como, velocidade, massa adicionada, geometria, propriedades mecânicas do material, condições de carregamento, critério de falha e etc. Com esta finalidade, neste trabalho será desenvolvido uma primeira parte para a validação do modelo numérico em relação a um ensaio experimental, e outra parte para a aplicação a um caso de colisão e análise dos resultados.

2. Ensaio Experimental

No período entre 1997 e 1998, foram feitos no Dutch Institute for Applied Physical Research (2) 4 experimentos em escala de 1/3 simulando a colisão entre navios. No experimento o navio agredido, com casco duplo, foi simulado pela construção da sua parte central do costado. O navio agressor é simulado no teste experimental adicionando-se na parte de proa de um navio um bulbo (veja na foto da Figura 1) que colide em ângulo de 90° contra a parte central do costado com uma velocidade de aproximadamente de 2.55 m/s.



Figura 1: Foto do Teste experimental

A medição da força de colisão correspondente a cada profundidade da penetração, proporciona a determinação da curva energia absorvida vs profundidade da penetração, ambas as curvas mostradas na Figura 2 (3).

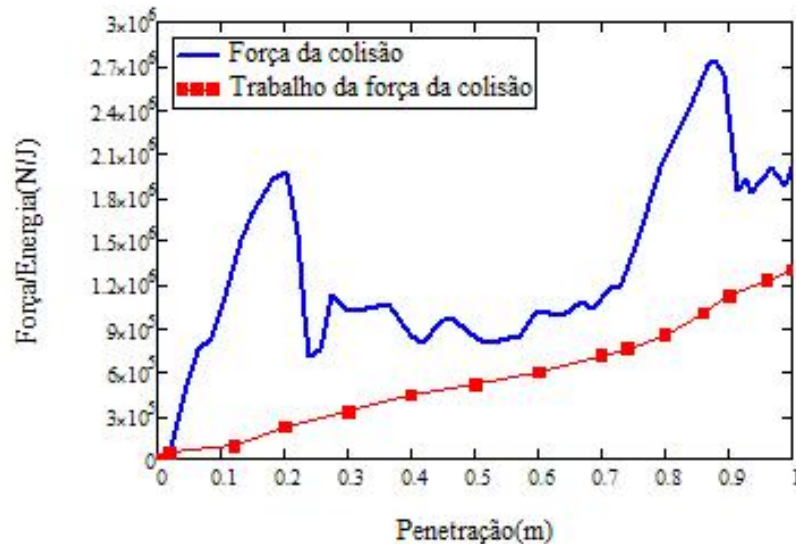
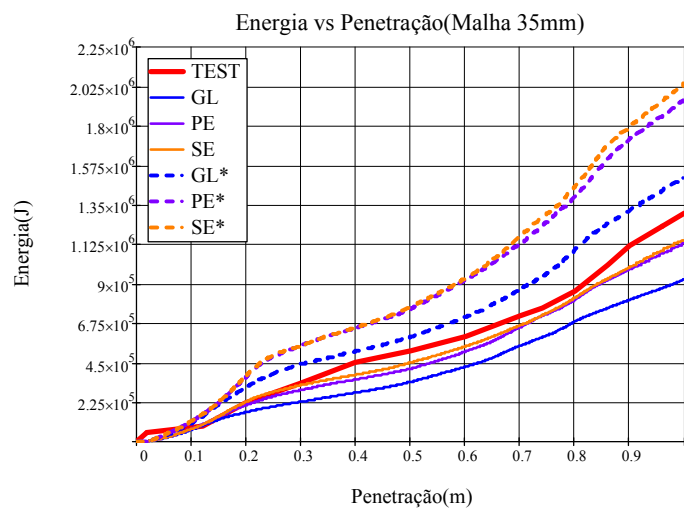
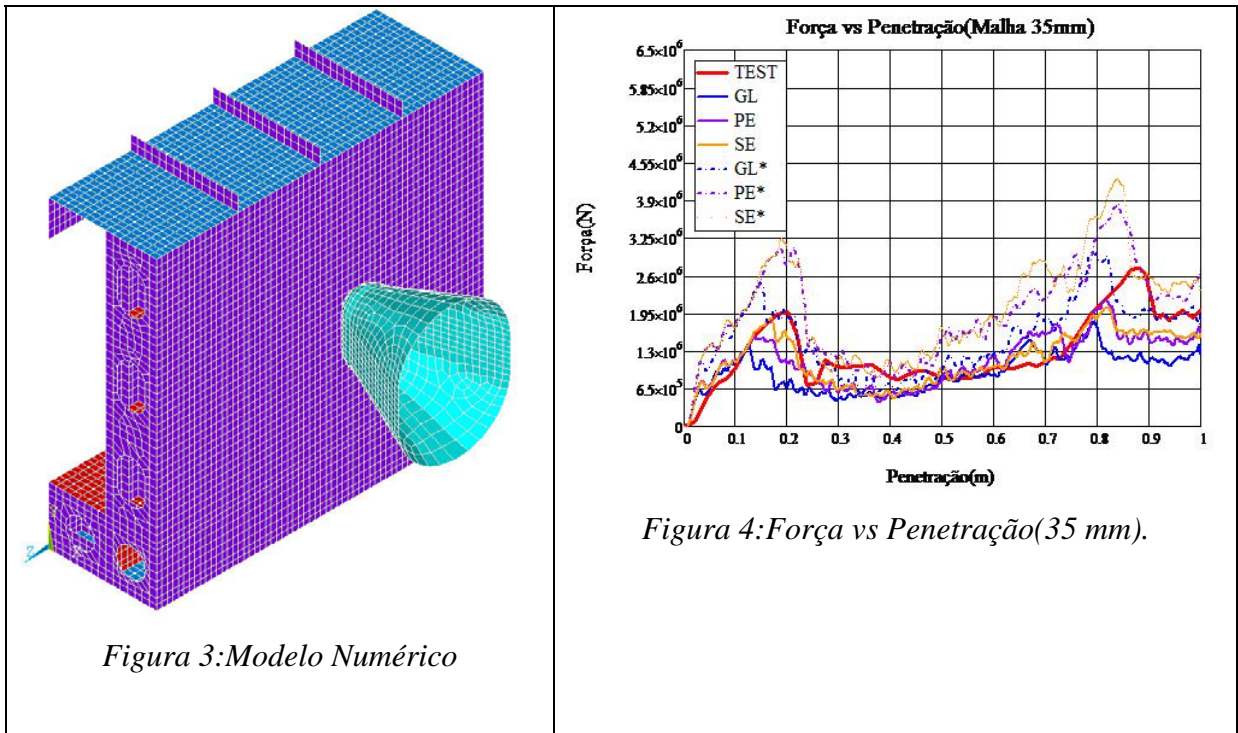


Figura 2: Medida da força da colisão e energia

3. Modelo Numérico

Na Figura 3 é apresentado o modelo geométrico do teste desenvolvido no Programa ANSYS/LS-DYNA, utilizando-se o elemento retangular de casca de Belytschko-Tsay, denominado TE_1 no programa LS-DYNA, e é baseado na teoria de casca de Mindlin-Reissner, onde o esforço cortante é incluído. O elemento TE_2 do LS-DYNA também foi testado e os dois elementos apresentaram resultados muito próximos. O custo computacional utilizando o elemento TE_2 foi 8% maior que o elemento TE_1, sendo este o escolhido para realização das análises.

Nas análises de colisão um parâmetro importante é o critério de ruptura empregado, que definirá se na região de impacto haverá rompimento dos membros estruturais, caracterizados na análise numérica pela desconexão de nós nesta região. Utilizou-se o modelo de elementos finitos do teste experimental para averiguar qual o critério de ruptura fornecerá resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente, entre os critérios utilizados.



Nestas análises os seguintes critérios foram empregados: deformação plástica equivalente, critério do Germanisher Lloyd (4) e critério de Peschman (3). As curvas da Figura 4 mostram os resultados em termos das curvas Força versus Penetração e na Figura 5 as curvas Energia de Deformação versus Penetração, com tamanho de malha de 35 mm na região do impacto. Nesta figura, GL representa o critério do Germanisher Lloyd, PE o critério de Peschman e SE o critério de deformação plástica equivalente, todos sem considerar a taxa de deformação. As outras três curvas (GL*,PE*,SE*) são os mesmos critérios de ruptura, mas considerando a taxa de deformação. Outras análises foram realizadas empregando-se elementos com lados de 50 mm e 100 mm. Como pode ser observado das curvas na Figura 5 os critérios PE e SE são os que apresentaram resultados mais próximos do obtido experimentalmente, e como nos casos das malhas mais grossas o critério de Peschman (PE) forneceu melhores resultados, este foi o critério de ruptura escolhido para ser usado nas análises da colisão entre o PSV e o FPSO.

Contacto

Modelar problemas de contato é uma das tarefas mais complexas numa simulação de impacto usando o método de elementos finitos. Geralmente, não se conhece todas as regiões que entrarão em contato até que uma análise seja realizada. No programa LS-DYNA está disponível o algoritmo “Single Surface Contact” que estabelece o contacto quando a superfície de um corpo penetra a superfície de outro. Os tipos usados nestas análises são o contacto geral e o contacto automático. No contacto automático simples de superfícies (ASSC), a superfície de contacto é automaticamente estabelecida quando a superfície de um corpo toca à superfície de outro corpo. Esse tipo de algoritmo é fácil de usar, porque nenhum contato ou definição da superfície do alvo são obrigatórios. É eficiente para áreas de contato que ainda não são conhecidas. A principal vantagem do procedimento de contato automático geral (AG) é que basea-se em algoritmos de contato mais recentes, conseqüentemente, seu desempenho pode ser melhor do que ASSC em algumas aplicações. Os resultados obtidos indicam que a força de impacto é insensível para ambos os tipos de contacto.

4. Análise da colisão de PSV e FPSO

Neste item a colisão entre um FPSO e um navio de apoio PSV (Platform Supply Vessel) será simulada numericamente utilizando-se os parâmetros anteriormente

analisados. Neste item o objetivo é calcular a energia crítica de colisão, considerando-se distintos cenários de colisão, incluindo os casos de ruptura do casco do navio. Uma comparação é feita entre a energia crítica determinada com o modelo de elementos finitos e a calculada com o modelo analítico proposto em [5].

Características das embarcações

Os navios utilizados para a aplicação foram um navio FPSO de casco simples com 321.903 Tonn e outro é um navio de apoio PSV de 6.125 Tonn, que tem como principal função transportar cargas e pessoal necessário a operação de plataformas de petróleo offshore. Na Tabela 1 são apresentadas as características principais de cada embarcação.

Tabela 1

CARACTERISTICAS	F P S O	BARCO DE APOIO
<i>L_{PP} (m)</i>	320	70,16
<i>Boca(m)</i>	54,5	14,,67
<i>Pontal(m)</i>	27,8	6,07
<i>Calado Máximo(m)</i>	21,62	5,04
<i>Calado Mínimo(m)</i>	7,00	
<i>TPB (Ton)</i>	282.750	
<i>Peso Leve (Ton)</i>	39, 153	3050
<i>Deslocamento (Ton)</i>	321.903	6125
<i>Raio de Giração (m)</i>	80	
<i>Velocidade durante a Colisão (Knots)</i>	0,0	2,0
<i>Massa Adicional / Massa da Embarcação (Surge)</i>	-	0,05
<i>Massa Adicional / Massa da Embarcação (Sway)</i>	-	0,86
<i>Massa Adicional / Massa da Embarcação (Yaw)</i>	-	0,21

Modelo de elementos finitos

Na Figura 6 são apresentados os modelos de elementos finitos do FPSO e do PSV. Para o PSV, navio agressor, é necessário modelar apenas sua proa considerada como um corpo rígido, e o FPSO é representado pelo tanque que sofrerá a colisão e metade de seus tanques vizinhos.

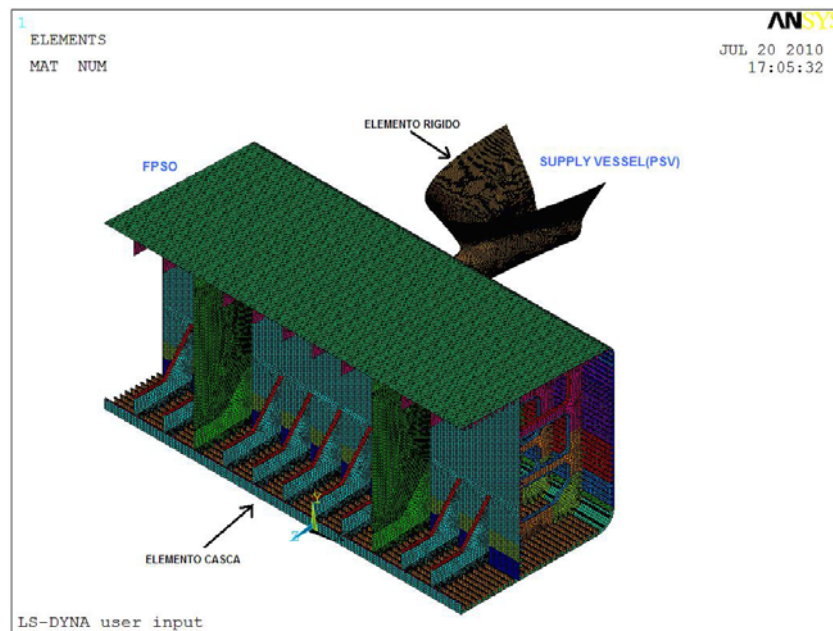


Figura 6: Modelo Numérico de elementos finitos

Na Figura 6 foram apresentados os tanques com corte longitudinal para visualização de sua estrutura interna. Simetria longitudinal não foi considerada. As propriedades mecânicas do aço empregado se encontram na Tabela 2. A correspondente curva de tensão VS. deformação plástica logarítmica verdadeira é mostrada na Figura 7.

Tabela 2

Tensão de escoamento	324 MPA
Modulo de Young	210000 MPA
Coefficiente de Poisson	0.3

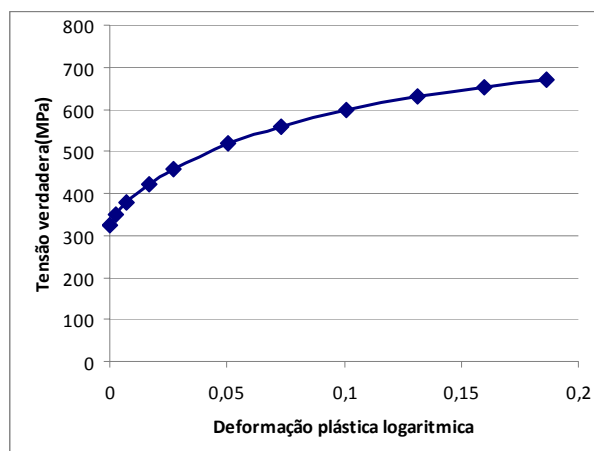


Figura 7: Tensão verdadeira VS. deformação plástica logarítmica do material

Como não é considerada toda a estrutura do PSV para a modelagem da colisão é preciso conhecer o seu centro de massa. Os valores calculados da posição do centro de massa é o seguinte:

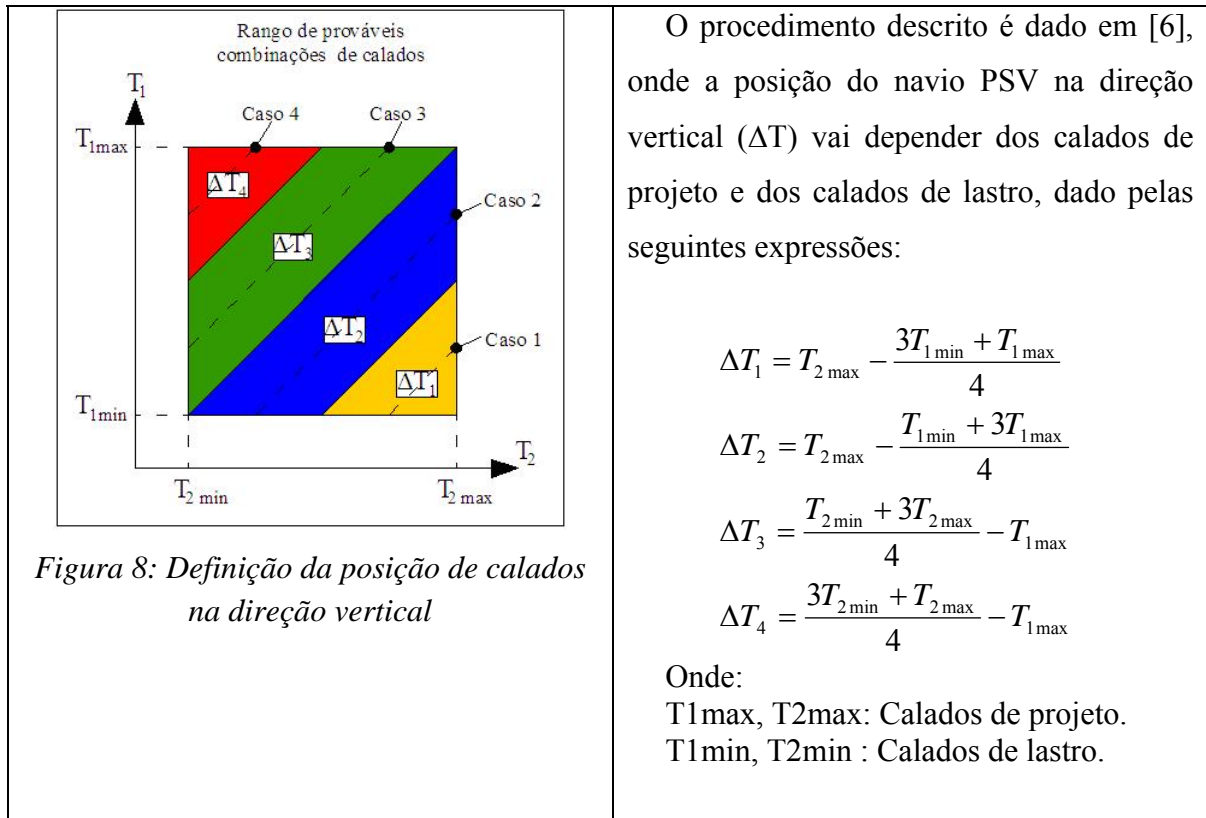
Longitudinal: 35,32 m

Transversal: 0m

Vertical: A posição vertical dependerá do cenário de colisão .

Cenários de colisão

Na Figura 8 mostram-se todas as possibilidades de colisão em relação aos calados de ambos os navios, que são divididos em 4 regiões. Cada diagonal representa uma variação de calado equivalente. Por tanto, cada diagonal representa um caso de colisão, que corresponde à possibilidade de máxima massa para ambos os navios.



Adicionalmente, a posição na direção longitudinal do navio agressor também levará à mudança no valor da energia crítica. Na Figura 9 são esquematizados os dois casos de colisão considerados no sentido longitudinal:

Caso 1: Colisão direita sobre a caverna.

Caso 2: Colisão sobre o ponto médio entre duas cavernas

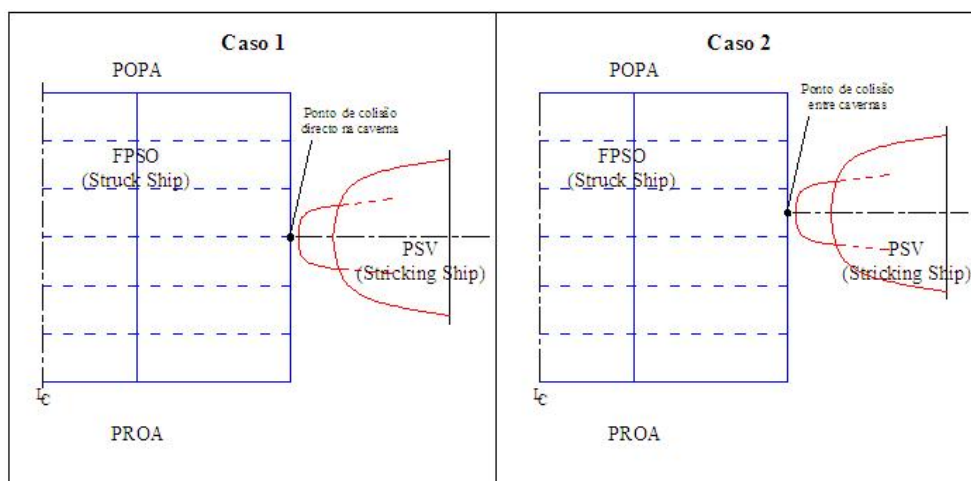


Figura 9: Cenários da colisão na direção longitudinal

Cálculo da energia de deformação crítica

Para o cálculo da energia da deformação crítica, foram feitas 8 análises por elementos finitos (4 na posição vertical e 2 na direção longitudinal) modelado no ANSYS/LS-DYNA. Todas as considerações feitas para o caso de validação do modelo foram adotadas nestas análises. A determinação da energia de deformação para cada caso citado é determinada e a energia de deformação crítica pode ser expressa pelas equações abaixo:

Entre cavernas

$$\overline{E}_{m1} = \frac{(E_{m1,1} + 3E_{m1,2} + 3E_{m1,3} + E_{m1,4})}{8}$$

Diretamente sobre caverna

$$\overline{E}_{r1} = \frac{(E_{r2,1} + 3E_{r2,2} + 3E_{r2,3} + E_{r2,4})}{8}$$

O valor médio desses 2 valores é a Energia Crítica

$$\overline{E}_{crit} = \frac{(E_{m1} + E_{r1})}{2}$$

Cálculo da energia de deformação crítica

Para se avaliar a energia de deformação crítica calculada através da modelagem de elementos finitos se fará uma comparação com o cálculo analítico desenvolvido por Pedersen[5], que determina a energia crítica em caso de colisão, onde o valor da energia dissipada tem que ser menor do que a energia crítica de deformação.

A energia cinética total dissipada é absorvida pela deformação/ruptura da estruturas dos navios. A formulação para calcular a energia dissipada foi implementada usando o Programa MatchCAD. Os cálculos para cada cenário de colisão foi realizado com

velocidades de 1.8 m/s e 3,6 m/s para o navio agressor(PSV). Deve ser ressaltado que nesta formulação não são consideradas as posições longitudinais do navio agressor em relação ao navio agredido havendo, portanto, apenas 4 cenários de colisão. Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para a energia dissipada:

Tabela 3 Energia dissipada segundo o cálculo analítico

Cenário de colisão	Variação de calado(m)	Energia dissipada (MJ)	
		V=1,8 m/s	V=3,6 m/s
1	17,93	5,16	23,02
2	16,06	8,52	37,98
3	11,47	10,25	45,69
4	4,16	10,13	45,17

Tamanho dos elementos da malha

As dimensões dos elementos da malha é um fator importante para este tipo de análise, como visto anteriormente. Para o presente caso só se refinou a região onde vai acontecer a colisão, a Figura 10 mostra a malha de elementos com 50 mm de lado que apresenta uma boa aproximação. O critério de ruptura aplicado na análise é o de Peschman, portanto se calculou a deformação de ruptura dada pela formulação por ele proposta, para cada membro estrutural do navio para que se simule a ruptura quando for atingida aquele valor de deformação.

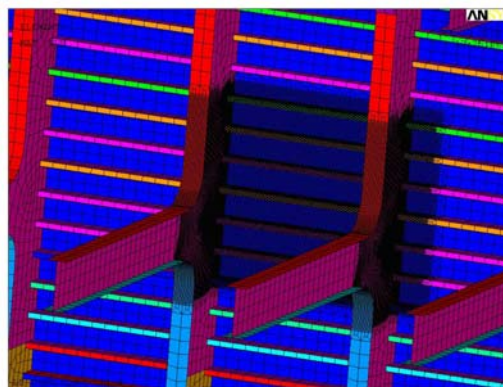


Figura 10 Malha do modelo

6. Redução do modelo

Devido ao excessivo tempo computacional para se realizar a análise de colisão por elementos finitos do modelo completo, considerando dois porções do navio FPSO, foi necessário fazer-se uma redução do modelo. Esta redução deve objetivar a economia no

tempo de computação sem grandes alterações na resposta da força de impacto e na energia de interna de deformação. Isto foi conseguido fazendo-se as seguintes simplificações:

-Impacto diretamente na caverna: o navio agressor deve atingir o FPSO na parte central considerando-se 5 cavernas.

-Impacto entre cavernas: o navio agressor deve atingir o chapeamento na parte central considerando-se 6 cavernas.

Transversalmente, considerou-se apenas a parte estrutural do FPSO compreendida entre a antepara longitudinal e o costado. Nos esquemas mostrados na Figura 11, todas as considerações feitas em relação à redução do modelo estão representadas.

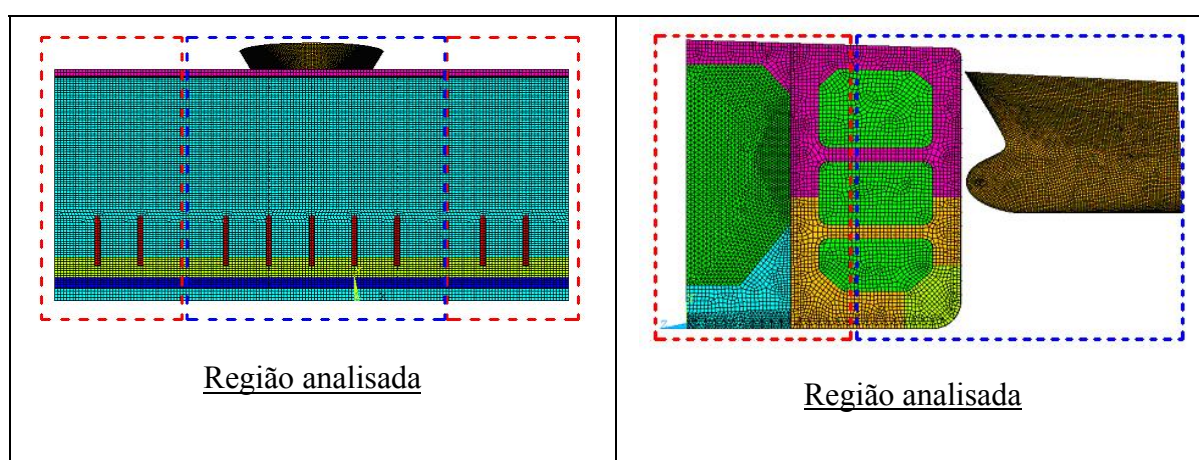


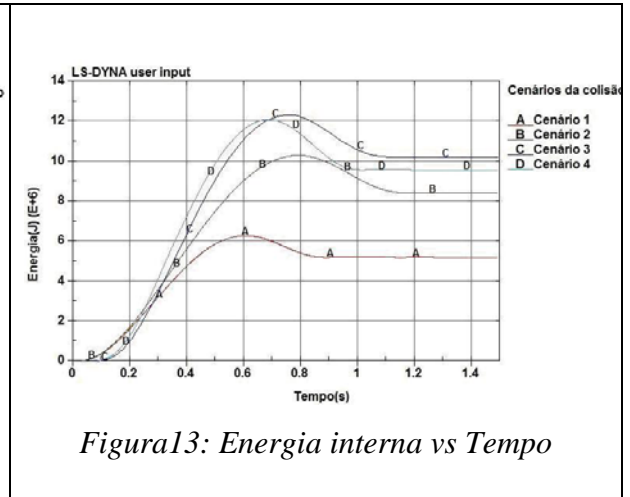
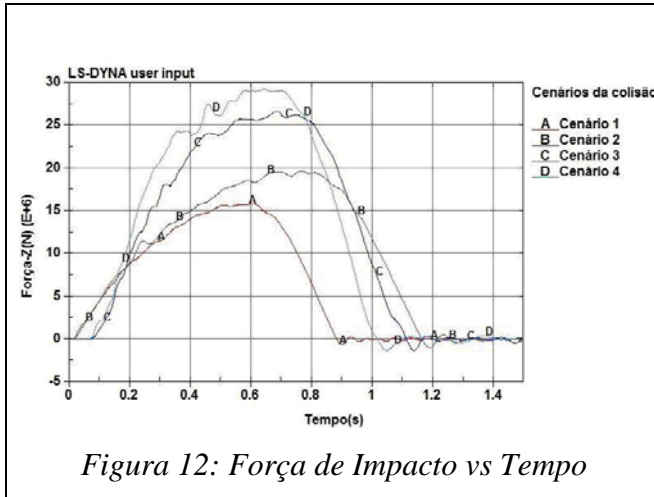
Figura 11: Redução do modelo numérico

As condições de contorno, para ambos os casos, que apresentaram melhores resultados quando comparados com o modelo completo foi o de restrição completa dos nós nas cavernas da extremidade e dos nós que estariam em contato com a antepara longitudinal.

No modelo reduzido utilizaram-se elementos com dimensões iguais a 50 mm na região do costado do FPSO onde haverá a colisão e nas demais regiões foi empregada malha com elementos de 300x350 mm, resultando numa boa aproximação para os cálculos. O critério de falha aplicado nas análises foi o de Peschman.

7. Resultados no instante da colisão

A Figura 12 e a Figura 13 mostram as curvas da força de impacto e energia interna em relação ao tempo quando o navio colide entre cavernas, para os distintos cenários de colisão. para uma velocidade de 1,8 m/s.



Na Tabela 4 apresentam-se para os cenários de colisão, correspondentes às diferenças de calados (ΔT), a força máxima de penetração, a energia de deformação e a profundidade máxima de penetração para velocidades da colisão de 1,8 m/s e 3,6 m/s. Deve ser ressaltado que em nenhum dos casos para velocidade de colisão de 1,8 m/s houve ruptura do casco devido o baixo valor da energia de deformação, caso contrário acontece para a velocidade de colisão de 3,6 m/s. Além disso, apresentam-se a energia de deformação dos principais membros estruturais em porcentagem da energia de deformação total do casco. Nas porcentagens correspondentes aos enrijecedores foram incluídas as parcelas do chapeamento de convés e de fundo, isso já que eles têm pouca participação na energia de deformação.

Tabela 4: Resumo dos resultados para velocidades de 1,8m/s e 3,6m/s

Cenários (V=1,8m/s)	ΔT	Força Max. (MN)	Energia (MJ)	Profundidade(m)
Entre cavernas (BWF)				
1	17,92	15,86	6,29	0,65
2	16,06	19,71	10,3	0,89
3	11,47	26,7	12,32	0,92
4	4,16	29,28	12,09	0,84
Diretamente na caverna (DWF)				
1	17,92	15,88	6,13	0,62
2	16,06	18,62	9,25	0,88
3	11,47	27,26	11,89	0,73
4	4,16	30,47	11,82	0,65

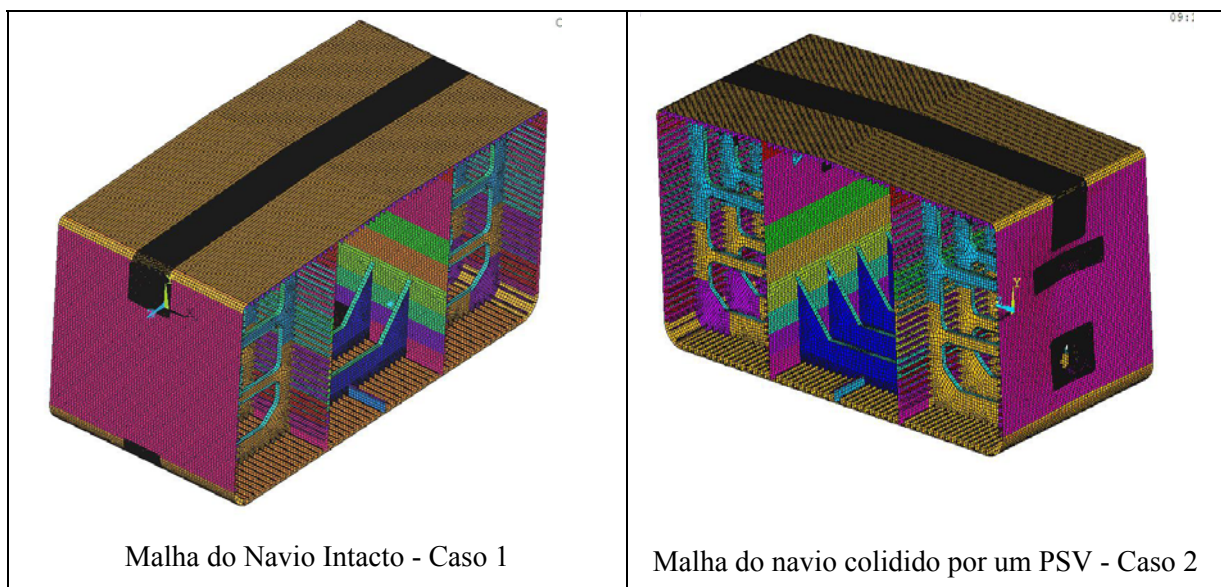
% da Energia de deformação (V=1,8m/s)			
Cenários	Costado	Cavernas	Enrijecedores
Entre cavernas (BWF)			
1	48,92	31,99	19,09
2	47,53	33,01	19,46
3	40,92	31,06	28,02
4	38,39	35,72	25,89
Diretamente na caverna (DWF)			
1	39,05	43,46	17,48
2	42,95	39,87	17,18
3	35,74	41,08	23,17
4	32,57	44,16	23,27

Cenários (V=3,6m/s)	ΔT	Força Max. (MN)	Energia (MJ)	Profundidade(m)
Entre cavernas (BWF)				
1	17,92	28,22	20,18	1,4
2	16,06	26,9	25,89	2,17
3	11,47	53,03	46,66	1,89
4	4,16	52,23	42,56	1,9
Diretamente na caverna (DWF)				
1	17,92	28,22	20,18	1,4
2	16,06	26,9	25,89	2,17
3	11,47	53,03	46,66	1,89
4	4,16	52,23	42,56	1,9

% da Energia de deformação (V=3,6m/s)			
Cenários	Costado	Cavernas	Enrijecedores
Entre cavernas (BWF)			
1	52,95	30,49	16,56
2	52,37	17,79	29,83
3	50,40	25,93	23,67
4	48,84	26,73	24,43
Diretamente na caverna (DWF)			
1	54,58	30,53	14,89
2	41,78	27,34	30,87
3	46,57	29,41	24,01
4	46,43	30,34	23,23

8. Resistência Global após colisão

O objetivo principal em esta parte é analisar o comportamento global da estrutura do navio sob flexão longitudinal de tosamento e alquebramento do navio antes e depois de uma colisão. Para tal, considerou-se a seção mestra do navio FPSO do modelo que foi analisado anteriormente, procedendo-se a sua modelação e análise no programa ANSYS. Foram adicionadas as imperfeições geométricas nas placas do fundo e de convés. Foi realizado um estudo de sensibilidade da malha para se obter uma boa aproximação nas respostas de colapso e pós-colapso e evitar um esforço computacional adicional desnecessário. Foram estudados três casos para a análise da resistência longitudinal (Ver Figura 14): o primeiro caso é o do FPSO intacto, o segundo caso foi o FPSO colidido por um PSV com uma velocidade de 3,6 m/s e um terceiro caso onde são simulados um dano de 25% envolvendo o convés e o costado do navio e um dano de 75 % entre o costado e o fundo do navio. O comportamento do casco sob flexão é expresso de uma forma muito simples através da relação entre o momento de flexão imposto e a curvatura resultante da deflexão do casco. Esta relação pode ser obtida através da imposição de uma seqüência de incrementos de rotações nas seções extremas do modelo computacional, determinando-se para cada uma delas o momento fletor correspondente, assumindo que as seções planas se mantêm planas.



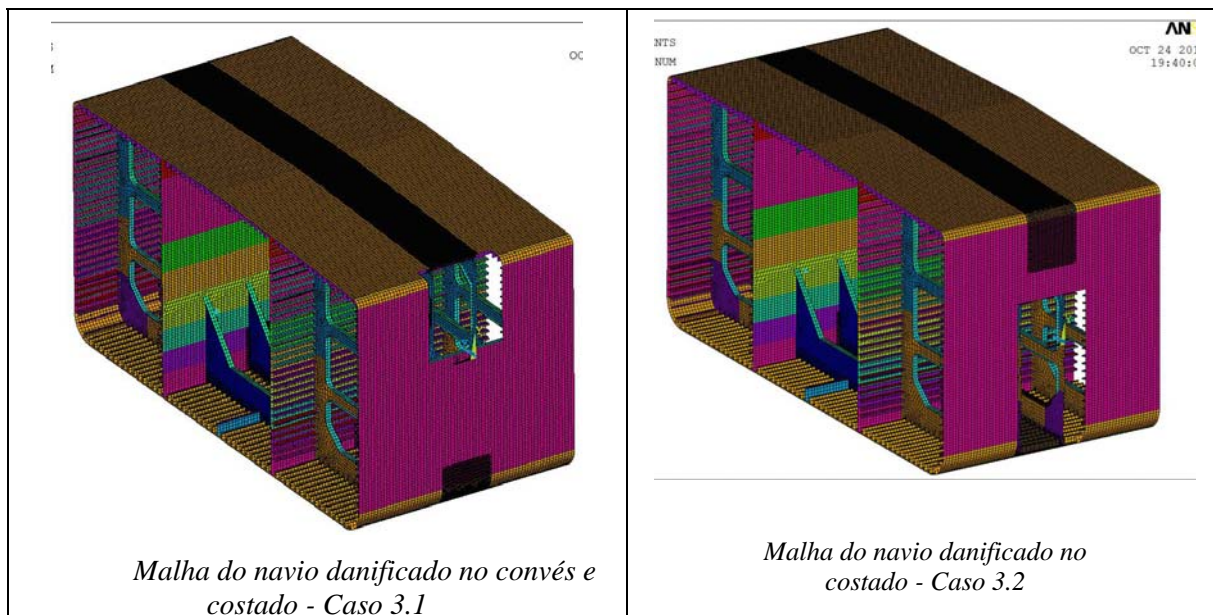


Figura14: Modelamento Numérico do 3 casos de danos

9. Resultados

Apresentamos a seguir na Figura 15 o comportamento global da estrutura do FPSO para os três casos de danos, submetidos a tosamento e alquebramento. Dos gráficos pode ser visto que as diferenças são pequenas no regime linear elástico e as discrepâncias passam a ser mais evidentes próximos ao colapso e no comportamento pós-colapso. Observa-se que as maiores diferenças no momento de colapso nos casos com danos em relação ao navio intacto foram os casos 3.1 e 3.2, devido as suas maiores variações na rigidez. O caso 2 não teve muita variação no momento último comparado com o navio intacto quando submetido à tosamento, mas em alquebramento o momento de colapso foi próximo ao dos outros casos.

Caso 1: Navio intacto

Caso 2: Navio colidido por uma Platform Supply Vessel (PSV) a uma velocidade de 3,6 m/s.

Caso 3.1: Navio com dano do 25% no painel entre o costado e convés - costado.

Caso 3.2: Navio com dano de 75% no painel entre o fundo e costado

Observa-se que segundo os critérios dados pela Sociedade Classificadora ABS para a condição de navio com dano, para o tosamento a perda de resistência prevista foi de cerca de 25% e para o alquebramento 20%, bem superiores aos determinados empregando-se o MEF.

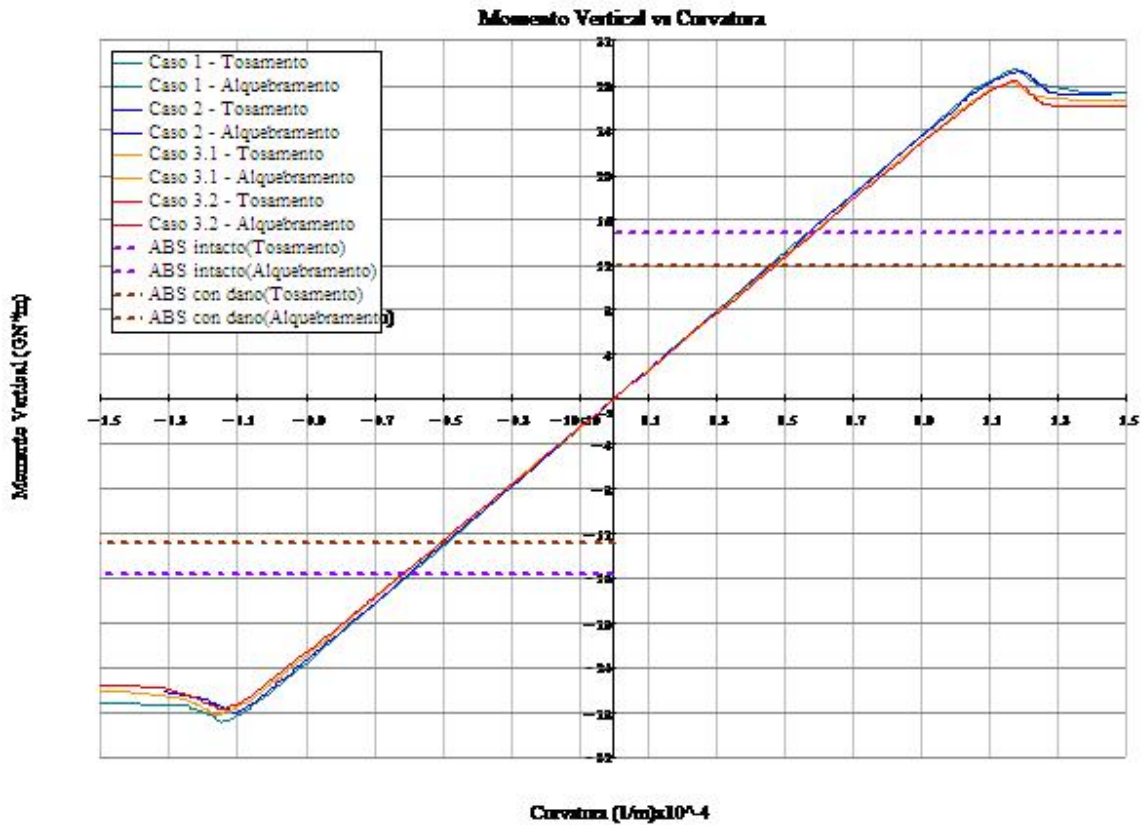


Figura 15: Momento Fletor vs Curvatura do Navio

Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos valores do momento fletor máximo admissível para os casos definidos anteriormente.

Tabela 5: Resumo dos momentos máximos no instante do colapso global

ITEM	Casos	Momento Fletor (GN.m)		Diferenças no Momento (%)	
		Tosamento	Alquebramento	Tosamento	Alquebramento
1	Caso 1	29,39	28,89	100	100
2	Caso 2	29,31	28,09	99,7	97,2
3	Caso 3.1	28,23	28,18	96,1	97,5
4	Caso 3.2	28,27	27,58	96,2	95,5

Na tabela 6 é apresentado o resumo das curvaturas para cada caso:

Tabela 6: Resumo das curvaturas do navio no instante do colapso global

ITEM	Casos	Curvatura ($10^{-4} \times 1/m$)	
		Tosamento	Alquebramento
1	Caso 1	1,175	1,147
2	Caso 2	1,192	1,112
3	Caso 3.1	1,168	1,160
4	Caso 3.2	1,157	1,127

Na Figura 16 apresentam-se os níveis de tensões de Von Mises para tosamento do caso 2. O início da flambagem dos elementos estruturais em tosamento em este caso acontece entre a antepara longitudinal e o convés, próximo a área onde existe a ruptura do casco, o valor máximo da tensão de Von Mises foi de 443MPa. Quando submetido a alquebramento o início do colapso acontece na chapa central do navio com máxima tensão de Von Mises de 489 MPa.

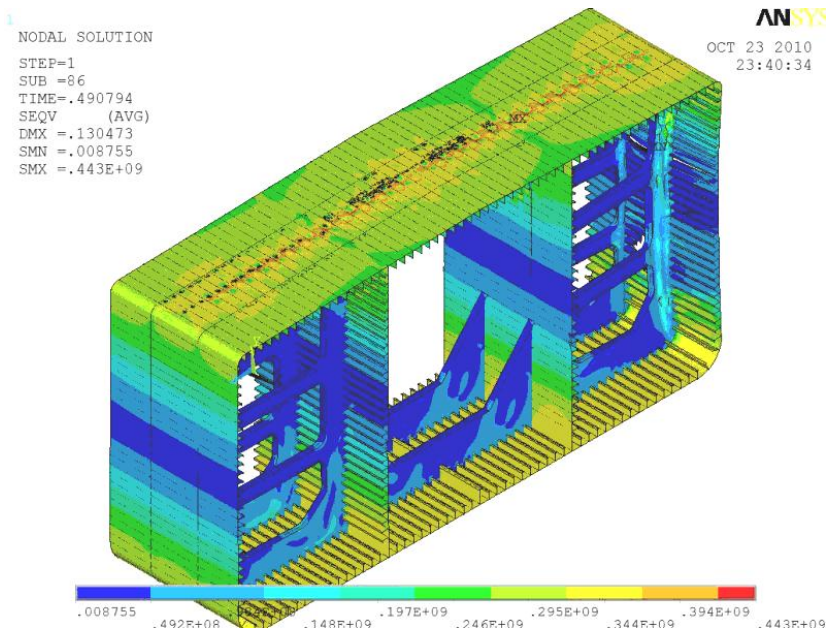


Figura 16: Modelo de Tosamento -Pós - colapso (Caso2)

10. Comentários gerais

- Desenvolveu-se um modelo em elementos finitos utilizando o programa ANSYS/LS-DYNA para comparar os resultados com um teste experimental simulando a colisão entre dois navios, com todas as considerações do caso para reproduzir a força de impacto durante a colisão. Mostrou-se que o modelo empregado reproduziu com boa fidelidade o fenômeno e que o critério de ruptura de Peschman apresentou o melhor comportamento considerando-se os distintos tamanhos de malha.
- Foi feita uma comparação entre os resultados de um estudo analítico dado por Pedersen para o cálculo da energia dissipada durante a colisão e a energia de deformação obtida na análise numérica através da simulação de uma colisão entre um FPSO e um Supply Vessel, utilizando-se a mesma metodologia usada na comparação com o teste experimental. Mostrou-se que o método analítico fornece

resultados, para a energia de deformação, muito próximos aos obtidos numericamente, nos casos de baixos valores de energia. Para casos de altos valores de energia, o método analítico tende a superestimar a energia de deformação com diferenças razoáveis em relação aos determinados numericamente.

- Desenvolveu-se um modelo reduzido de elementos finitos que apresentou resultados muito bons e com grande economia no tempo de computação para o cálculo da resistência global do navio FPSO submetido à flexão longitudinal em tosamento e alquebramento
- Do os resultados podem-se predizer quais os conjuntos de componentes estruturais são mais suscetíveis a apresentar maiores deformações na área atingida pela colisão. Esta informação possibilita a tomada de decisão ainda na fase de projeto para que providências possam ser tomadas para garantir a resistência do casco em cenários de colisão mais prováveis.

11. Referências Bibliográficas

- [1] A.W.VREDEVELT, L.J.WEVERS, L AND LEMMEN, et al. Full Scale ship Collision Test, In:3er International Symposium on Structural Crashworthiness and Failure, Liberpool,1993.
- [2] TÖRNQVIST R, Design of crashworthy ship structures. PhD Dissertation, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 2003
- [3] J.PESCHMANN and A. Kulzep, Final report for BMBF Life-Cycle Design, Part D2A: Side collision of double skin ships, Technical University of Hamburg, 2000 (Contract BMBF 18S0129).
- [4] PURNENDU K. DAS, NIGEL BARLTROP, 'A comparative Study on the structural integrity of single and double side bulk carriers under collision damage'. Marine Structures 18(2005) 511-547
- [5] PEDERSEN, P. T., ZHANG, S., On impact mechanics in ship collisions. Marine Structure 11 (1998), pp. 429-449(1998)
- [6] ZHANG L, EGGE ED, BRUHMS H., et al., Aprova Procedure concept for Alternative Arrangements, In: Proceedings of the Third International conference on Collision and grounding of Ship, Japan 2004:84-97.

- [7] HAGBART S. ALSOS. Analysis of Ship Grounding. Assesment of ship damage, fracture and hull girder behavior. Ph.D Dissertation, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 2008.
- [8] SHIP STRUCTURE COMMITTEE 2004, Modeling Longitudinal Damage in ship Collisions, SSC Report SR-1426.
- [9] LS DYNA THEORY MANUAL. Contact impact Algotihm.
- [10] O. KITAMURA. FEM Approach to the simulation of collision and grounding damage. Marine Estructures 15(2002) 403 – 428
- [11] MINORSKY VU. Analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships, Journal Ship Resources .1959
- [12] J. PESCHMANN, Energy absorption computations of ship steel structures under collision and grounding (translated from German language), Doctoral Dissertation, Technical University of Hamburg, 2001
- [13] BHATTACHARYYA, R., Dynamics of Marine Vehicles. New York, Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, 1978.